



**Dmytro
V. Vinnychenko**
Вінниченко
Дмитро
Валерійович

УДК 621.314.5

THE INFLUENCE OF THE FREQUENCY OF THE RESONANT CIRCUIT ON THE POWER OF A THREE-PHASE HIGH VOLTAGE TRANSFORMERLESS RESONANT CHARGER

ВПЛИВ ЧАСТОТИ РЕЗОНАНСНОГО КОЛА НА ПОТУЖНІСТЬ ТРИФАЗНОГО ВИСОКОВОЛЬТНОГО БЕЗТРАНСФОРМАТОРНОГО РЕЗОНАНСНОГО ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2022.1\(17\).01](https://doi.org/10.15589/smi2022.1(17).01)



**Natalia
S. Nazarova**
Назарова
Наталя
Станіславівна

Dmytro V. Vinnychenko¹ Вінниченко Дмитро Валерійович,
канд. техн. наук
vdrvvs@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8894-860X

Natalia S. Nazarova² Назарова Наталя Станіславівна,
канд. техн. наук, доцент
nazarovanataly2000@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5506-750X

Iryna L. Vinnychenko³ Вінниченко Ірина Леонідівна,
канд. техн. наук, доцент
i.l.vinnychenko@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3768-1060



**Iryna
L. Vinnychenko**
Вінниченко
Ірина
Леонідівна

¹*Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*
Інститут електродинаміки Національної академії наук України, м. Київ

²*Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv*
Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв

³*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The research goal is to determine the dependence of the output charging current, charging time, and power of the three-phase high-voltage transformerless resonant charger of a capacitive energy storage device on the frequency of the resonant circuit. Research methods – mathematical analysis and simulation modelling by means of LTSpice. Processes in the three-phase high-voltage transformerless resonant charger of a capacitive energy storage device were analyzed. According to the simulation results, the dependences of the output charging current, the charging time to the specified voltage and the power of the charging device on the frequency of the resonant circuit were obtained. It is shown that, under the condition of the same resonant inductor current after a short circuit of the load, the curve of the dependence of the charging time on the frequency is similar to the curve of the capacitances ratio of the resonant capacitor and the capacitive energy storage. This shows the effect of the capacitance ratio on the dependence of the charging time, charging current and the power of the charger at the resonance frequency. A resonant frequency is determined, beyond which the charging current and the charger power practically do not increase. Expressions for calculating this frequency are given.

Research results can be applied to the design of high-voltage resonant chargers for capacitive energy storage devices. The conducted studies confirmed the possibility of obtaining a high voltage by using a resonant system and showed the influence of the frequency of the resonant circuit on the power of a high-voltage transformerless charging device. The obtained dependences made it possible to justify the frequency range for which the maximum power of the high-voltage resonant charger of the capacitive energy storage device will be provided.

Key words: high-voltage transformerless resonant charger; frequency; capacitive energy storage.

Анотація. Метою досліджень є визначення залежностей вихідного зарядного струму, часу зарядки та потужності трифазного високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача енергії від частоти резонансного кола. Методи дослідження – математичний аналіз та імітаційне моделювання засобами LTSpice. Проаналізовано процеси у трифазному високовольтному безтрансформаторному резонансному зарядному пристрої ємнісного накопичувача енергії. За результатами імітаційного моделювання отримано залежності в табличному вигляді вихідного зарядного струму, часу зарядки до заданої напруги та потужності зарядного пристрою від частоти резонансного кола. Показано, що за умови однакового струму крізь індуктор резонансного кола за коротким замиканням навантаження форма епюри залежності часу зарядки від частоти подібна до епюри відношення ємностей конденсатора резонансного кола та ємнісного накопичувача енергії. Це показує вплив відношення ємностей на залежність часу зарядки, зарядного струму та потужності зарядного пристрою від резонансної частоти. Визначена резонансна частота, за перевищення якої зарядний струм та потужність зарядного пристрою практично не збільшуються. Наведено вирази для розрахунку цієї частоти.

Результати досліджень можуть бути застосовані для проектування високовольтних резонансних зарядних пристроїв ємнісних накопичувачів енергії. Проведені дослідження підтвердили можливість отримання високої напруги шляхом використання резонансної системи та показали вплив частоти резонансного кола на потужність високовольтного безтрансформаторного зарядного пристрою. Отримані залежності дозволили обґрунтувати частотний діапазон, за яким буде забезпечено найбільшу потужність високовольтного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача енергії.

Ключові слова: високовольтний безтрансформаторний резонансний зарядний пристрій; частота; ємнісний накопичувач енергії.

References

- [1] Rizun, A., Golen', Yu., Denisyuk, T., Kononov, V., Rachkov, A. (2012). Source of electric discharge energy for ecologically clean destruction technologies. Surface engineering and applied electrochemistry. Vol. 48. P. 469–470. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375512050110>.
- [2] Rizun, A.R., Boguslavskiy, L.Z., Hohen, Yu.V., Denisuk, T.D. (2008). Development and introduction of technological process of electrical discharge cleaning of marine stationary platforms from biological overgrowing. Science and innovations. Vol. 4(6). P. 66–70. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin4.06.026>.
- [3] Rizun, A., Golen', Yu., Denisiuk, T. (2008). Electric-discharge cleaning of stationary sea platforms of biological growth. Surface engineering and applied electrochemistry. Vol. 44. P. 501–503. DOI: 10.3103/S1068375508060136.
- [4] Vovchenko, A.I., Boguslavsky, L.Z., Miroshnichenko, L.N. (2010). Trends in the development of high-power high-voltage pulse current generators at the Institute of IPPT of NAS of Ukraine. Tekhnichna Elektrodynamika. No. 5. P. 69–74.
- [5] Vinnychenko, D., Nazarova, N., Vinnychenko, I. (2022). Transformerless high-voltage resonant charging systems for capacitive energy storage devices for electro-discharge technologies. Proc. of IEEE 41st International conference on electronics and nanotechnology (ELNANO 2022). P. 727–731. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9927052.
- [6] Volkov, I.V., Gubarevich, V.N., Isakov, V.N., Kaban, V.P. (1981). Principles of construction and optimization of circuits of inductive-capacitive converters. Kyiv: Naukova dumka. 176 p.

- [7] Spirin, V.M., Hubarevich, V.M., Marunia, Y.V., Salko, S.V., Grebenyuk, V.G. (2019). Optimization of inductive-capacital converter with bridge one-phase rectifier, capacitary filter and parallel active load. *Technical electrodynamics*. No. 6. P. 25–29. DOI: 10.15407/techned2019.06.025.
- [8] Volkov, I.V., Podolnyi, S.V. (2017). Controllable resonant type converter development for capacitor charging loads. *Technical electrodynamics*. No. 6. P. 11–17. DOI: 10.15407/techned2017.06.011.
- [9] Pentegov, I.V. (1982). *Fundamentals of the theory of capacitive energy storage devices charging circuits*. Kyiv: Naukova Dumka. 422 p.
- [10] Amjad, M., Salam, Z., Facta, M., Ishaque, K. (2012). Design and development of a high-voltage transformer-less power supply for ozone generators based on a voltage-fed full bridge resonant inverter. *Journal of power electronics*. Vol. 12(3). P. 387–398. DOI: 10.6113/JPE.2012.12.3.387.
- [11] Salam, Z., Facta, M., Amjad, M. (2013). Transformerless power supply based on single switch resonant inverter for ozone generation. *Applied power electronics conference and exposition (APEC)*. P. 3330–3333. DOI: 10.1109/APEC.2013.6520779.
- [12] Burány, N., Huber, L. (2008). Corona discharge surface treater without high voltage transformer. *IEEE Transactions on power electronics*. Vol. 23. No. 2. P. 993–1002. DOI:10.1109/tpel.2007.915760.
- [13] Teschke, M., Korzec, D., Finantu-Dinu, E. G., Engemann, J., Kennel R. (2004). Resonant, high voltage, high power supply for atmospheric pressure plasma sources. *Proc. of IEEE 35th Annual power electronics specialists conference*. Vol. 1. P. 835–839. DOI: 10.1109/PESC.2004.1355858.
- [14] Dede, E., Espi, J.M., Jordan, J., Ferreres, A. (1997). Design considerations for transformerless series resonant inverters for induction heating. *Proceedings of Second International conference on power electronics and drive systems*. P. 1–6. DOI: 10.1109/PEDS.1997.618726.
- [15] Nakao, K., Ishida, H., Nakao, N., Kimura, N. (2017). Application and verification of an electromagnetic field resonance type wireless power transfer method to mixing blade heated by induction heating. *Proc. 19th International conference on electrical drives and power electronics (EDPE)*. P. 159–164. DOI: 10.1109/EDPE.2017.8123273.
- [16] Kazanivsky, M. (2010). Lazer power supply based on multiphase resonance converters. *Proc. of International conference on modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET)*. P. 115.
- [17] Montes, O.A., Son, S., Kim, S., Seok, H., Lee, J.S., Kim, M. (2017). Forward-flyback resonant converter for high-efficient medium-power photovoltaic applications. *Proc. of IEEE Applied power electronics conference and exposition (APEC)*. P. 1223–1228. DOI: 10.1109/APEC.2017.7930851.
- [18] Xu, S., Shen, W., Qian, Q., Zhu, J., Sun, W., Li, H. (2019). An efficiency optimization method for a high frequency quasi-ZVS controlled resonant flyback converter. *Proc. of IEEE Applied power electronics conference and exposition (APEC)*. P. 2957–2961. DOI: 10.1109/APEC.2019.8722026.
- [19] Spirin, V.M., Gubarevich, V.M., Salko, S.V., Marunia, Yu.V., Grebenyuk, V.G. (2019). Determination of the coefficient of conversion of the bridge of single-phase rectifier with power from the inductive capacitor converter and parallel active capacity load. *Tekhnichna elektrodynamika*. No 5. P. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.043>.
- [20] Vinnychenko, D.V., Nazarova, N.S., Vinnychenko, I.L. (2023). Research of characteristics of high voltage transformerless resonant charger of capacitary storage device. *Tekhnichna elektrodynamika*. No. 2. P. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.021>.
- [21] Vinnychenko, D.V., Nazarova, N.S., Chuschak, S.V. Pat. 152028 Ukraine, IPC H03K 3/53 (2006.01). High-voltage generator of impulse currents. No. u202106752; statement 29.11.21; published 19.10.22, Bull. No. 42. 5 p.

Постановка завдання. Інноваційні високовольтні електророзрядні технології останнім часом набувають актуальності для морської інфраструктури. Наприклад, це технологія руйнування донних ґрунтів для реконструкції морських і річкових портів

[1, с. 469] або технологічного процесу електророзрядного очищення морських стаціонарних платформ та корпусів суден і кораблів від біологічного заростання [2, с. 66; 3, с. 501]. Для таких технологій використовується спеціальне електрообладнання

з потужністю від 1 кВт, яке заряджає ємнісний накопичувач енергії (ЄНЕ) до 50 кВ [4, с. 72] і називається високовольтним зарядним пристроєм (ЗП). Для отримання високої напруги зазвичай використовують високовольтні трансформатори, вага яких разом зі струмообмежуючими елементами досягає від 30 до 60% загальної ваги електрообладнання [4, с. 72]. Підвищення питомих енергетичних показників електрообладнання (Вт/кг) завжди актуальне для автономних бортових систем живлення. Тому обладнання для морських суден зазвичай розроблюється та працює на підвищеній частоті (400 Гц та вище), що дозволяє знизити масу та габарити бортових електромагнітних перетворювачів. Один зі шляхів підвищення питомих енергетичних показників високовольтних зарядних пристроїв, що полягає у відмові від високовольтного трансформатора, запропоновано авторами в [5, с. 727]. Для отримання високої вихідної напруги зарядного пристрою використовуються властивості послідовних резонансних кіл багатократно підвищувати напругу на індуктивному та ємнісному елементах кола. Натепер електричні характеристики високовольтних безтрансформаторних резонансних пристроїв (БТРЗП) досліджено не досить повно, зокрема, питання вибору частоти резонансного кола досі не розглядалось. Сучасний рівень потужної перетворювальної техніки дозволяє працювати на будь-якій частоті до 100 кГц, тому дослідження впливу частоти резонансного кола на характеристики БТРЗП і обґрунтування частотного діапазону, за яким буде забезпечено найбільшу потужність, є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід зазначити, що використання подібних резонансних систем як раніше, так і зараз в основному обмежувалось створенням джерел незмінного струму, в яких питання отримання високих напруг не розглядалось або рекомендовувалось застосовувати високовольтні трансформатори [6–8]. Необхідність застосування високовольтних трансформаторів у зарядних пристроях ЄНЕ обґрунтовано в роботі І.В. Пентегова [9, с. 41]. У цій

роботі отримано оптимальний коефіцієнт трансформації, за яким забезпечується мінімальна габаритна потужність реактивних елементів у резонансному колі індуктивно-ємнісного перетворювача (ІЄП) джерела напруги в джерело струму, що є джерелом незмінного зарядного струму. Для отримання високих напруг таким зарядним пристроєм (більше 10 кВ) оптимальний коефіцієнт трансформації трансформатора перевищує 10. Тому у виробництві зарядних пристроїв продовжували використовувати високовольтні трансформатори, як 50-герцові, так і високочастотні кілогерцового діапазону [4, с. 72]. Слід відзначити, що з проблемами, пов'язаними із застосуванням високочастотних трансформаторів, стикаються розробники обладнання для різноманітних технологій. Тому у сучасних розробках існує тенденція створення високовольтних безтрансформаторних резонансних систем. Натепер відомо використання безтрансформаторних високовольтних резонансних систем для передачі потужності у високовольтних пристроях генерування озону (до 4 кВ, до 100 Вт) [10; 11], високовольтної корони (до 20 кВ, до 100 Вт) [12, с. 993], електричної дуги атмосферного тиску (5 кВ, 200 Вт) [13, с. 835], індукційного нагріву [14, с. 1; 15, с. 159], у системах накачки лазерів [16, с. 115], бездротових систем зарядки [17, с. 1223; 18, с. 43] тощо. Напруги та потужності таких систем значно менші необхідних для електророзрядних технологій. Тобто питання, пов'язані з розробкою високовольтних потужних зарядних пристроїв на основі резонансних систем з напругою вище 10 кВ та потужністю вище 1 кВт, досі не розглядались.

Таким чином, розробка безтрансформаторних високовольтних потужних зарядних пристроїв для електророзрядних технологій є актуальною проблемою.

Виокремлення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Як показано в [4; 5], вхідна напруга високовольтних зарядних пристроїв може бути як однофазною, так і трифазною. Загальним для показаних у [5] схем безтрансформаторних резонансних зарядних пристроїв є замикання резонансного

кола на нейтраль, у тому числі і для трифазної системи живлення, що відрізняє їх від схем, відомих з наведених літературних джерел. Але високовольтні безтрансформаторні резонансні зарядні пристрої досліджено не досить, відкритим залишається залежність їх потужності та інших характеристик від робочої частоти резонансного кола. З огляду на значне підвищення питомих енергетичних показників (Вт/кг) таких зарядних пристроїв порівняно з наявними [4, с. 72] дослідження їх характеристик є актуальним.

Метою роботи є визначення залежностей вихідного зарядного струму, часу зарядки та потужності трифазного високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача енергії від частоти резонансного кола.

Об'єктом дослідження є енергетичні процеси у високовольтних системах електророзрядних установок різного технологічного призначення.

Предмет досліджень – електричні процеси у високовольтних силових колах електророзрядних систем, у тому числі високовольтних резонансних безтрансформаторних зарядних пристроях.

Методи досліджень – математичне та імітаційне комп'ютерне моделювання.

Виклад основного матеріалу. Функціональну схему трифазного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою з перетворювачем частоти у складі генератора імпульсних струмів (ГІС), запропоновану авторами, наведено на рис. 1.

Зарядний пристрій містить три однакових індуктивних дроселі 1, три однакових високовольтних конденсатори 2 та трифазний високовольтний випрямляч 3. Ємнісний накопичувач енергії 4, високовольтний комутатор 5 та електродна система 6 належать розрядному колу генератора імпульсних струмів. У склад зарядного пристрою входить трифазний перетворювач частоти 8. Розділовий конденсатор 7 призначено для підключення ЄНЕ до нейтралі. Кожна пара індуктивного дроселя 1 та з'єднаного з ним високовольтного конденсатора 2 утворює послідовне резонансне коло, власна частота якого дорівнює частоті на високочастотному виході трифазного перетворювача частоти 8.

Від трифазної промислової мережі живлення крізь індуктивні дроселі відбувається зарядка ємнісного накопичувача енергії 4 до заданої зарядної напруги. В трьох однакових резонансних колах, утворених послідовним з'єднанням кожного індуктивного дроселя 1 та високовольтного конденсатора резонансного 2, налаштованих на високу частоту перетворювача частоти 8, відбувається резонанс напруг, у результаті якого на кожному періоді синусоїдної напруги на кожному виході перетворювача частоти 8 збільшується напруга на високовольтному конденсаторі 2, та струм крізь індуктивний дросель 1. Швидкість зростання напруги задається відношенням реактивних опорів індуктивного дроселя 1 та високовольтного конденсатора 2 резонансного кола таким чином, щоб забезпечити заряд ємнісного накопичувача 4

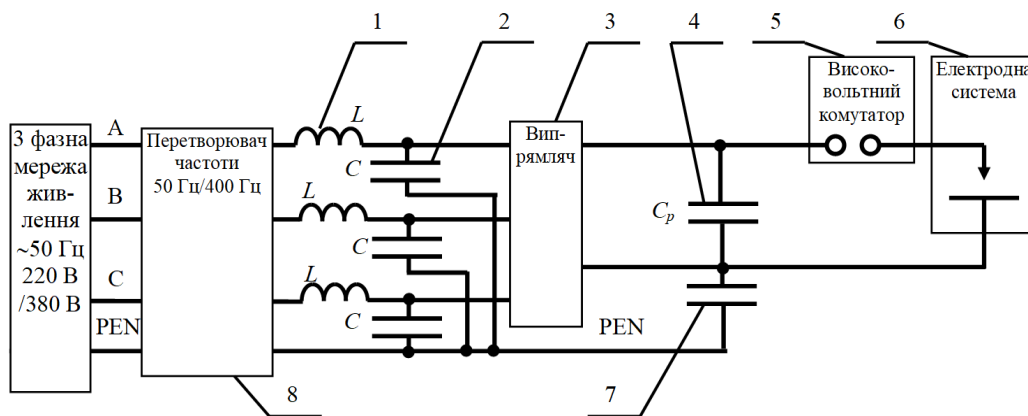


Рис. 1. Безтрансформаторний резонансний зарядний пристрій із використанням перетворювача частоти у складі ГІС

до заданої напруги за заданий час. Завдяки тому, що на кожному періоді синусоїдної напруги на виході перетворювача частоти 8 збільшується напруга на високовольтному конденсаторі 2 таким чином, що перевищує поточну напругу на ємнісному накопичувачі енергії 4, відкриваються діоди трифазного високовольтного випрямляча 3, виконаного, наприклад, за схемою Ларіонова. Відкриті діоди забезпечують зарядний струм ємнісного накопичувача енергії 4. Середній струм зарядки перебуває в діапазоні $0,76I_{\text{ср}} \leq 1,2I$ та визначається згідно з [5, с. 728] за формулою:

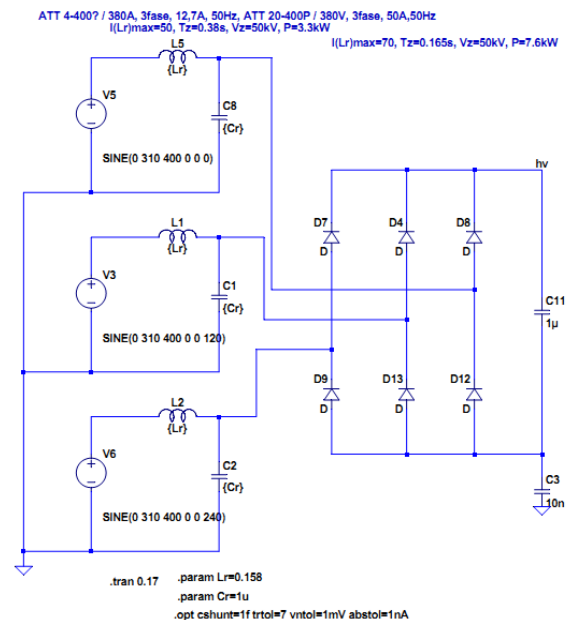
$$I = k_f U / (\omega L), \quad (1)$$

де ω та U – частота та фазна напруга на виході перетворювача частоти 8, L – індуктивність індуктивного дроселя 1, k_f – коефіцієнт, що залежить від схеми високовольтного випрямляча. k_f завжди менше одиниці (див., наприклад, [19, с. 43]). Струм крізь індуктор резонансного кола за коротким замиканням навантаження дорівнює $ISC = U/(k_f)$. Завдяки цьому зарядка ємнісного накопичувача енергії 4 відбувається майже за лінійним законом. Максимальна зарядна напруга може бути задана, наприклад, за допомогою некерованого повітряного високовольтного комутатора 5 шляхом завдання міжелектродного проміжку, який відповідає заданій напрузі, або за допомогою керованого високовольтного комутатора 5, який спрацьовує у разі досягнення заданого рівня напруги на ємнісному накопичувачі енергії 4.

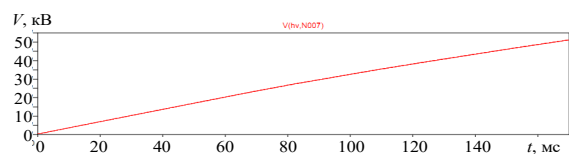
У разі досягнення заданої зарядної напруги високовольтний комутатор 5 спрацьовує і підключає ємнісний накопичувач енергії 4 до електродної системи 6, завдяки чому відбувається розряд ємнісного накопичувача енергії 4 на навантаження, яке розташоване в міжелектродному проміжку електродної системи 6. Цикл повторюється відповідно до технологічного процесу електророзрядної технології.

Для дослідження процесів у трифазному БТРЗП проведено комп'ютерне імітаційне моделювання засобами LTSpice (рис. 2). Відповідну до схеми (див. рис. 1) імітаційну модель наведено на рис. 2 а, на якому напруга високочастотного виходу перетворю-

вача частоти задана трьома зміщеними за фазою джерелами ЕРС з напругою 220 В та змінною частотою (від 50 Гц до 6400 Гц). Результати моделювання наведено на рис. 2 б, на якому показано залежність напруги на ємнісному накопичувачі енергії від часу.



а)



б)

Рис. 2. Імітаційна модель високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою ЄНЕ (а) та залежність його вихідної напруги від часу (б)

Для отримання залежності часу зарядки ємнісного накопичувача енергії безтрансформаторним резонансним зарядним пристроєм від частоти резонансного кола в табличному вигляді проведено імітаційне моделювання трифазного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою за варіюванням частоти від 50 Гц до 6400 Гц та однаковим вихідним струмом зарядного пристрою. Відповідно до виразу (1) за резонансною частотою зарядний струм залежить тільки від напруги живлення та реактивного опору $\omega_0 L$. Тому для забезпечення однакового зарядного струму відповідно до виразу (1) за різними частотами потрібно змінювати індуктивність резонансного кола. Відповідно, змінюється і

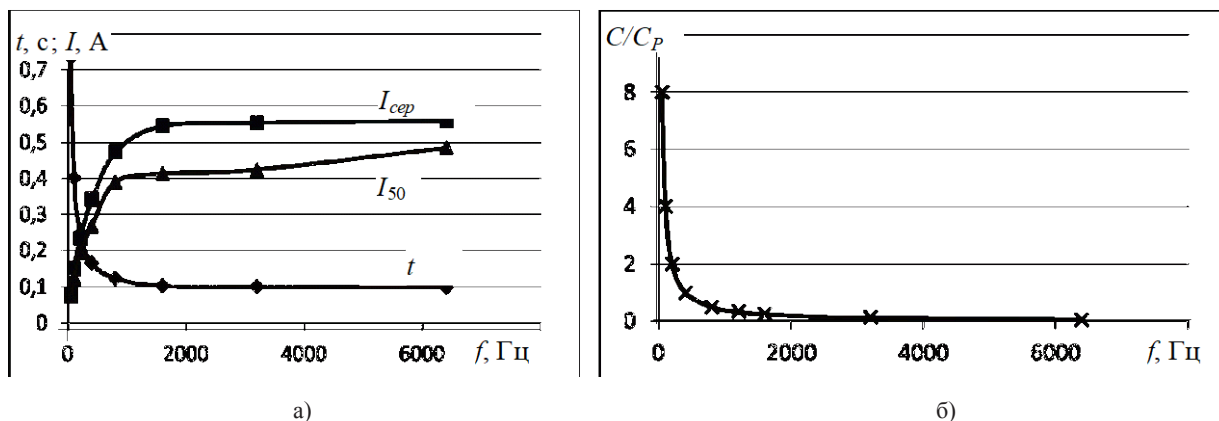


Рис. 3. Середній зарядний струм та час заряду у разі різних резонансних частот для трифазного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою (а) й відношення ємності резонансного конденсатора до ємності ЄНЕ (б)

ємність резонансного кола для забезпечення умови резонансу:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (2)$$

Результати моделювання, отримані в табличному вигляді, наведено в графічному вигляді на рис. 3. На рис. 3 а наведено середній зарядний струм I_{sep} за весь час заряду ЄНЕ ГПС, середній зарядний струм наприкінці процесу заряду у разі 50 кВ I_{50} та час заряду t у разі різних резонансних частот для трифазного ЗП, на рис. 3 б – залежність відношення ємності резонансного конденсатора C до ємності ЄНЕ C_p для поточної частоти резонансного кола. Наприкінці процесу заряду у разі 50 кВ I_{50} середній зарядний струм зменшується, що пояснюється зростанням напруги на навантаженні (див. [20, с. 25]).

Відповідно до отриманих результатів чим більше зарядний струм, тим менше час зарядки ЄНЕ.

Результати дослідження показують залежність зарядного струму від резонансної частоти в табличному вигляді. У разі збільшення резонансної частоти зарядний струм зростає. Після визначеної частоти f_{sat} зарядний струм зростає набагато повільніше.

Слід відзначити, що за умови однакового струму крізь індуктор резонансного кола за коротким замиканням навантаження I_{SC} форма епюри часу зарядки ЄНЕ залежно від частоти резонансного кола (див. рис. 3) подібна до форми епюри відношення ємностей конденсатора резонансного кола та ЄНЕ. Аналіз отриманих залежностей (див. рис. 3) дозволяє визначити критерій макси-

мальної резонансної частоти f_{sat} , після якої зарядний струм практично не збільшується:

$$k_{Cp} = \left. \frac{C}{C_p} \right|_{f=f_{sat}} \quad (3)$$

На рис. 4 наведено залежність потужності трифазного високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою (де $W \cdot f_{np}$ – енергія зарядженого ЄНЕ, f_{np} – частота проходження розрядних імпульсів, обернено пропорційна часу зарядки t ЄНЕ $f_{np} = 1/t$ до визначеної напруги, в такому випадку до 50 кВ) від резонансної частоти, при $\omega L = \text{const}$, розраховану за результатами моделювання в LTSpice.

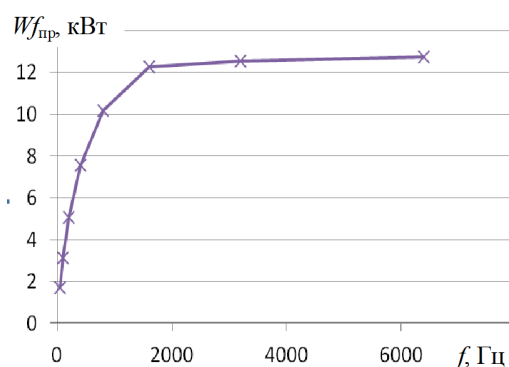


Рис. 4. Залежність потужності трифазного високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою ЄНЕ від частоти резонансного кола

Згідно з епюрами струму та потужності, наведеними на рис. 3 б та рис. 4, частота f_{sat} , за якою зарядний струм I_{sep} та потужність зарядного пристрою $W \cdot f_{np}$ практично не збільшується, знаходиться у діапазоні від 1600 до 2000 Гц, що відповідає діапазону значень $k_{Cp} = C/C_p$ від 0,25 до 0,2.

З урахуванням того, що $\omega L = \text{const}$ та виразу (2) отримуємо:

$$C = \frac{1}{\omega \cdot \text{const}}, \quad (4)$$

$$k_{cp} = \frac{C}{C_p} = \frac{1}{C_p \omega \cdot \text{const}}, \quad (5)$$

звідки

$$\omega = \frac{1}{C_p k_{cp} \cdot \text{const}}. \quad (6)$$

За $k_{cp}=0,2$ відповідна циклічна резонансна частота визначиться за виразом $\omega = \frac{5}{C_p \cdot \text{const}}$. Вирази (3), (4) дозволяють знайти резонансну частоту $f = f_{sat}$, залежну від ємності ЄНЕ, за якою або вищою максимально використовується вихідний струм резонансного кола.

Таким чином, за однакового струму, визначеного за виразом (1), час заряду ємнісного накопичувача та його потужність залежить від частоти резонансного кола. За частотою, більшою f_{sat} , зарядний струм I_{cep} та потужність зарядного пристрою $W f_{np}$ практично не збільшуються. Розрахувати цю частоту можна за заданим вихідним струмом зарядного пристрою, що визначається за виразом (1), заданим відношенням ємності резонансного кола до ємності ємнісного накопичувача зарядного пристрою k_{cp} та виразом (6).

За результатами проведених досліджень одержано патент України на корисну модель

генератора імпульсних струмів з трифазним безтрансформаторним резонансним зарядним пристроєм [21].

Обговорення результатів. Проведені дослідження підтвердили можливість отримання високої напруги шляхом використання резонансної системи та показали вплив частоти резонансного кола на потужність високовольтного безтрансформаторного зарядного пристрою. Отримані залежності дозволили обґрунтувати частотний діапазон, за яким буде забезпечено найбільшу потужність високовольтного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача енергії.

Висновки. Отримано залежності вихідного зарядного струму зарядного пристрою, часу зарядки до заданої напруги та потужності трифазного високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача енергії від частоти резонансного кола. Аналіз цих залежностей показав, що за збільшенням резонансної частоти зарядний струм та потужність зарядного пристрою зростають, а час зарядки зменшується. Таке зростання припиняється у разі досягнення частотою значення f_{sat} . Розрахувати цю частоту можна за заданим вихідним струмом зарядного пристрою та заданим відношенням ємності резонансного кола до ємності ємнісного накопичувача зарядного пристрою.

Список літератури

- [1] Rizun A., Golen' Yu., Denisyuk T., Kononov V., Rachkov A. Source of electric discharge energy for ecologically clean destruction technologies. *Surface engineering and applied electrochemistry*. 2012. Vol. 48. P. 469–470. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375512050110>.
- [2] Rizun A.R., Boguslavskiy L.Z., Holen Yu.V., Denisuk T.D. Development and introduction of technological process of electrical discharge cleaning of marine stationary platforms from biological overgrowing. *Science and innovations*. 2008. Vol. 4(6). P. 66–70. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin4.06.026>.
- [3] Rizun A., Golen' Yu., Denisiuk T. Electric-discharge cleaning of stationary sea platforms of biological growth. *Surface engineering and applied electrochemistry*. 2008. Vol. 44. P. 501–503. DOI: 10.3103/S1068375508060136.
- [4] Вовченко О.І., Богуславський Л.З., Мірошніченко Л.Н. Напрями розвитку потужних генераторів імпульсного струму високої напруги в Інституті ІФПТ НАН України. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 5. С. 69–74.
- [5] Vinnychenko, D., Nazarova, N., Vinnychenko, I. (2022). Transformerless high-voltage resonant charging systems for capacitive energy storage devices for electro-discharge technologies. *Proc. of IEEE 41st International conference on electronics and nanotechnology (ELNANO 2022)*. P. 727–731. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9927052.

- [6] Волков І.В., Губаревич В.Н., Ісаков В.Н., Кабан В.П. Принципи побудови та оптимізації схем індуктивно-ємнісних перетворювачів. Київ : Наукова думка. 1981. 176 с.
- [7] Спірін В.М., Губаревич В.М., Маруня Ю.В., Салко С.В., Гребенюк В.Г. Оптимізація індуктивно-ємнісного перетворювача з мостовим однофазним випрямлячем, ємнісним фільтром і паралельним активним навантаженням. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 6. С. 25–29. DOI: 10.15407/techned2019.06.025.
- [8] Volkov I.V., Podolnyi S.V. Controllable resonant type converter development for capacitor charging loads. *Technical electrodynamics*. 2017. No. 6. P. 11–17. DOI: 10.15407/techned2017.06.011.
- [9] Пентегов І.В. Основи теорії ланцюгів зарядки ємнісних накопичувачів енергії. Київ : Наукова думка. 1982. 422 с.
- [10] Amjad M., Salam Z., Facta M., Ishaque K. Design and development of a high-voltage transformer-less power supply for ozone generators based on a voltage-fed full bridge resonant inverter. *Journal of power electronics*. 2012. Vol. 12(3). P. 387–398. DOI: 10.6113/JPE.2012.12.3.387.
- [11] Salam Z., Facta M., Amjad M. Transformerless power supply based on single switch resonant inverter for ozone generation. *Applied power electronics conference and exposition (APEC)*. 2013. P. 3330–3333. DOI: 10.1109/APEC.2013.6520779.
- [12] Burány N., Huber L. Corona discharge surface treater without high voltage transformer. *IEEE Transactions on power electronics*. 2008. Vol. 23, No. 2. P. 993–1002. DOI:10.1109/tpel.2007.915760.
- [13] Teschke M., Korzec D., Finantu-Dinu E.G., Engemann J., Kennel R. Resonant, high voltage, high power supply for atmospheric pressure plasma sources. *Proc. of IEEE 35th Annual power electronics specialists conference*. 2004. Vol.1. P. 835–839. DOI: 10.1109/PESC.2004.1355858.
- [14] Dede E., Espi J.M., Jordan J., Ferreres A. Design considerations for transformerless series resonant inverters for induction heating. *Proceedings of Second International conference on power electronics and drive systems*. 1997. P. 1–6. DOI: 10.1109/PEDS.1997.618726.
- [15] Nakao K., Ishida H., Nakao N., Kimura N. Application and verification of an electromagnetic field resonance type wireless power transfer method to mixing blade heated by induction heating. *Proc. 19th International conference on electrical drives and power electronics (EDPE)*. 2017. P. 159–164. DOI: 10.1109/EDPE.2017.8123273.
- [16] Kazanivsky M. Lazer power supply based on multiphase resonance converters. *Proc. of International conference on modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET)*. 2010. P. 115.
- [17] Montes O.A., Son S., Kim S., Seok H., Lee J.S., Kim M. Forward-flyback resonant converter for high-efficient medium-power photovoltaic applications. *Proc. of IEEE Applied power electronics conference and exposition (APEC)*. 2017. P. 1223–1228. DOI: 10.1109/APEC.2017.7930851.
- [18] Xu S., Shen W., Qian Q., Zhu J., Sun W., Li H. An efficiency optimization method for a high frequency quasi-ZVS controlled resonant flyback converter. *Proc. of IEEE Applied power electronics conference and exposition (APEC)*. 2019. P. 2957–2961. DOI: 10.1109/APEC.2019.8722026.
- [19] Спірін В.М., Губаревич В.М., Салко С.В., Маруня Ю.В., Гребенюк В.Г. Визначення коефіцієнта перетворення моста однофазного випрямляча з живленням від індуктивного конденсаторного перетворювача та паралельного навантаження активної ємності. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.043>.
- [20] Вінниченко Д.В., Назарова Н.С., Вінниченко І.Л. Дослідження характеристик високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 2. С. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.021>.
- [21] Вінниченко Д.В., Назарова Н.С., Чушак С.В. Пат. 152028 Україна, МПК H03K 3/53 (2006.01). Високовольтний генератор імпульсних струмів. No u202106752; заява 29.11.21 ; опубліковано 19.10.22, Бюл. № 42. 5 с.